

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313.3

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СИСТЕМ С АСИНХРОННЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

ENERGY CALCULATION SYSTEM WITH INDUCTION MOTOR

Захаров Алексей Вадимович, канд. техн. наук, ведущий специалист по математическому моделированию и расчетам ПАО «Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт электромашиностроения» НИПТИЭМ, Россия, 600009, г. Владимир, ул. Электrozаводская, 1. E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru, Тел.: +74922331337

Alexey V. Zakharov, Cand. Sc., OJSC «Scientific Research and Design Institute of Technology Electrical Engineering» NIPTIEM Russia, 600009, Electroavodskaya street, 1, Vladimir, Russia. E-mail: zaharovav@ec.vemp.ru. Ph.: +74922331337

Аннотация: Важным этапом проектирования электромеханических, мехатронных, робототехнических систем с асинхронными электродвигателями является энергетический расчет, на этапах которого проводится выбор или проектирование электрической машины, осуществляющей электромеханическое преобразование энергии. Просчеты, связанные с неверным выбором или проектированием электродвигателя, приводят к высоким затратам. В работе рассмотрены основные этапы энергетического расчета, используемые специалистами НИПТИЭМ при проектировании электромеханических систем с асинхронными двигателями. Показано, что игнорирование ряда процедур энергетического расчета приводит к необходимости перепроектировать систему, что ведет к высоким экономическим потерям.

Abstract: An important step of designing electro-mechanical, mechatronic, robotic systems with induction motors is the energy calculation, the stages of which is the selection or design of electrical machines engaged in Electromechanical energy conversion. Failures associated with incorrect selection or design of the electric motor causes high costs. The paper considers the main stages of the energy calculation used by experts in NIPTIEM in the design of electromechanical systems with induction motors. It is shown that the neglect of a number of procedures for energy calculation leads to the necessity to redesign the system, leading to high economic losses.

Ключевые слова: Энергетический расчет систем; Потери энергии; Асинхронные электродвигатели; Электромеханические системы; Мехатроника.

Key words: Energy calculation; Power loss; Induction motor; Electromechanical system; Mechatronic.

ЭТАПЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Совершенствование характеристик приводной техники – основа для повышения технического уровня электромеханических, мехатронных и робототехнических систем. Максимальные показатели в части удельной мощности, момента, эффективности преобразования, диапазона регулирования могут быть достигнуты только при индивидуальном проектировании электрического привода под технологическую задачу. Использование электродвигателей унифицированных серий для построения на их основе мехатронных систем, а также их применение в приводах робототехнических систем, не позволяет получить максимальное снижение весогабаритных показателей, увеличение эффективности преобразования и улучшения других качественных характеристик.

Индивидуальное проектирование приводных систем – сложная задача, требующая использования подходов, полноценно

учитывающих физические основы электромеханического преобразования энергии, теорию электропривода, теорию автоматического управления, механику, а также специфику технологической задачи привода, на которую он ориентирован.

Энергетические характеристики силовой части системы, в первую очередь, определяют режимы, в которых она может быть использована, ее статические и динамические характеристики, надежность. Поэтому просчеты, возникающие при анализе энергетических характеристик системы, могут оказаться критическими для разрабатываемой системы. Это означает, что этап энергетического расчета является первым и основным этапом проектирования системы, а его результаты полностью определяют ее основные свойства.

На рис. 1 показана последовательность и основные этапы энергетического расчета.

Алгоритм расчета, является развитием энергетического расчета разработанного для следящих систем в МВТУ им. Баумана Б.К. Чемодановым, П.С. Мелкозеровым и другими учеными [1, 2]. Подход обеспечен математическими моделями, методиками расчета и проектирования, методами параметрической оптимизации, программами расчета и

моделирования, базами данных. Результатом применения подхода являются вычисления основных параметрических данных, необходимых для разработки конструкторской документации на электродвигатель, его систему охлаждения, режимы электропитания, рекомендации по настройке основных регуляторов системы управления силового преобразователя.

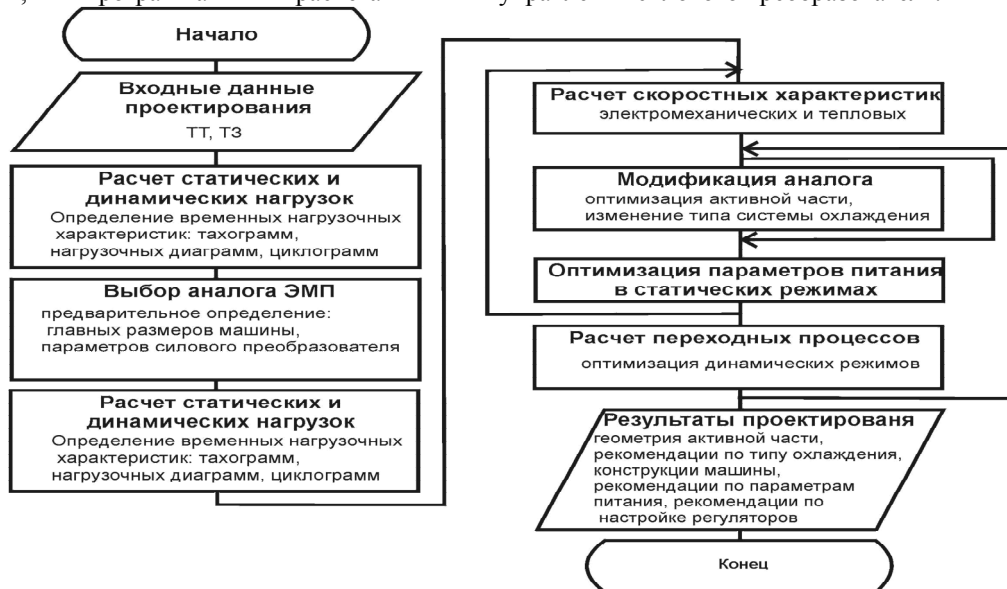


Рис 1. Алгоритм энергетического расчета

Предлагаемый алгоритм проектирования мехатронной системы основан на итерационном использовании энергетического анализа характеристик и свойств мехатронной системы совместно с тактикой постепенных модификаций ее силовых компонентов (электродвигателя, силового преобразователя, редуктора). При этом целесообразно начинать проведение синтеза системы с ее анализа при использовании серийно изготавливаемых компонентов мехатронной системы: электродвигателей, механических передач, преобразователей частоты и др.

Использование указанного подхода в проектах «НИПТИЭМ» ведется с 2008г. при проектировании электродвигателей для транспорта, горной техники, стендового оборудования и других приложений требующих высоких удельных энергетических показателей.

ИНСТРУМЕНТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Для проведения энергетического анализа систем необходимы соответствующие вычислительные инструменты, которые могут быть условно разделены на методики расчета и программы моделирования. Эти инструменты должны позволять проводить вычисление и имитационное моделирование электромагнитных,

электромеханических, тепловых, механических характеристик системы. При этом они должны учитывать влияние алгоритмов управления на указанные характеристики. Опыт проведения этапов энергетического расчета показал, что для его проведения необходимо иметь:

- программы расчета скоростных характеристик (зависимостей основных электромагнитных, электромеханических и тепловых показателей от частоты вращения);
- программы имитационного моделирования электромагнитных, электромеханических, тепловых и управляющих процессов;
- программы, позволяющие проводить параметрическую оптимизацию режимов электропитания машины.

Для решения задачи энергетического синтеза системы требуются:

- программы и методики, позволяющие проводить оптимизацию главных размеров, пазово-зубцовой геометрии активной части машины;
- программы и методики, позволяющие находить адекватные способы теплоотвода от основных элементов машины, и соответствующие этому теплоотводу параметры вентиляции;
- методики оценки стоимости элементов системы и методы оптимального конструирования;
- базу данных аналогов (базовых электродвигателей), включающую в себя

основные массогабаритные показатели, значения энергетических характеристик, главных размеров, существенных параметров пазово-зубцовой геометрии и обмотки.

КРИТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА

Опыт проектирования специальных электродвигателей показал, что критические ошибки, допущенные при проведении энергетического расчета, связаны с ошибкой в величине потерь в элементах электродвигателя, фактических показателях охлаждения и диапазоне регулирования. Остановимся на некоторых из них подробно.

1. Ошибки расчета потерь в элементах. Современный уровень электротехнических изделий высок. Часто, для превышения вновь разрабатываемым изделием актуальных показателей технического уровня приходится существенно превышать рекомендуемые показатели максимальных электрических и магнитных нагрузок на элементы активной части. Использовать конструкторские решения для пазово-зубцовой геометрии и обмотки, которые ранее были не рекомендованы.

Например, завышение мощности машин переменного тока заставляет увеличивать электромагнитные нагрузки на элементы магнитопровода. При превышении магнитной индукции в ядре статора выше 1.55Тл часть магнитного поля выходит из шихтованного магнитопровода активной части в сплошную станину (оболочку). Эффект проявляется в электродвигателях имеющих, оболочку как из ферромагнетиков, так и диамагнетиков. Величина потерь может достигать существенного значения и составлять до 500% (при индукции в спинке статора 1.75-1.8 Тл) от величины потерь в ядре статора.

Величина дополнительных потерь, обусловленных эффектом вытеснения магнитного поля из ядра статора в оболочку, должна обязательно учитываться при проектировании электродвигателей с высокими значениями индукции, а следовательно мощности. Для указанного учета целесообразно использовать методику представленную в работе [3] или непосредственно производить вычисление потерь на основе выражений:

$$\Delta_F = \sqrt{\frac{1}{\sigma \mu \mu_0 \pi f_1}}, \quad (1)$$

$$P_{add} = \frac{H_{F1}^2}{\Delta_F \sigma} D_{a1} L, \quad (2)$$

где Δ_F – глубина проникновения магнитного поля в оболочку, обусловленная скин-эффектом, σ – электрическая проводимость материала оболочки электродвигателя, μ – относительная магнитная проницаемость материала оболочки, f_1 – частота питания, H_{F1} – напряженность магнитного поля в станине, D_{a1} – наружный диаметр сердечника статора, L – длина сердечника. Как видно из выражений, увеличение магнитных потерь обусловлено вихревыми токами в скин-слое оболочки.

Часто имеется необходимость разработки и изготовления относительно крупных электродвигателей ВОВ 250-400 с высинной низковольтной обмоткой статора, имеющих высокие значения элементарных проводников в одном эффективном $n > 20$. Изготовление обмотки для такого электродвигателя затруднительно. Поэтому разработчики могут использовать следующие решения: использование шестифазной схемы с электрическим сдвигом 30 градусов; увеличение слоев обмотки; увеличение числа параллелей более, чем максимально рекомендуемое значение. Каждое из указанных решений, кроме схемы имеющую шестифазную обмотку со сдвигом 30 градусов, приводит к увеличению потерь в обмотке статора, которые необходимо оценивать. Введение дополнительных слоев в обмотку приводит к увеличению электрических потерь за счет разных индуктивностей обмотки на дне и в клиновой части паза.

На рис.2. показаны фазные токи, протекающие в верхней и нижней полуобмотках электродвигателя с ВОВ 250мм 2р=2, номинальной мощностью $P_2=200$ кВт, вращающегося при 1/3 от частоты вращения. На рисунке также приведены отношения суммарных потерь в обмотке статора к эквивалентному значению соответствующему одной обмотке при ее соединении в звезду (Y). Из рисунка видно, что при соединении полуобмоток в два треугольника (Δ) потери в обмотке статора увеличатся на 14% за счет распределения протекающего тока между верхней и нижней полуобмотками. При соединении полуобмоток в две звезды увеличение потерь будет меньше и составит 6%. Фактически при разработке таких электродвигателей разработчик использует включение обмоток в треугольник для максимального использования линейного напряжения.

Увеличение тока, возникающее в шестифазной схеме при ошибке в сдвиге между фазами, может быть рассчитано по формуле:

$$I_{ma} = E_0 \sin(0.5\alpha) / X_1 \quad (3)$$

где E_0 – э.д.с. холостого хода, α – ошибка фазного сдвига между фазами, X_1 – индуктивность рассеяния фазы шестифазной обмотки статора.

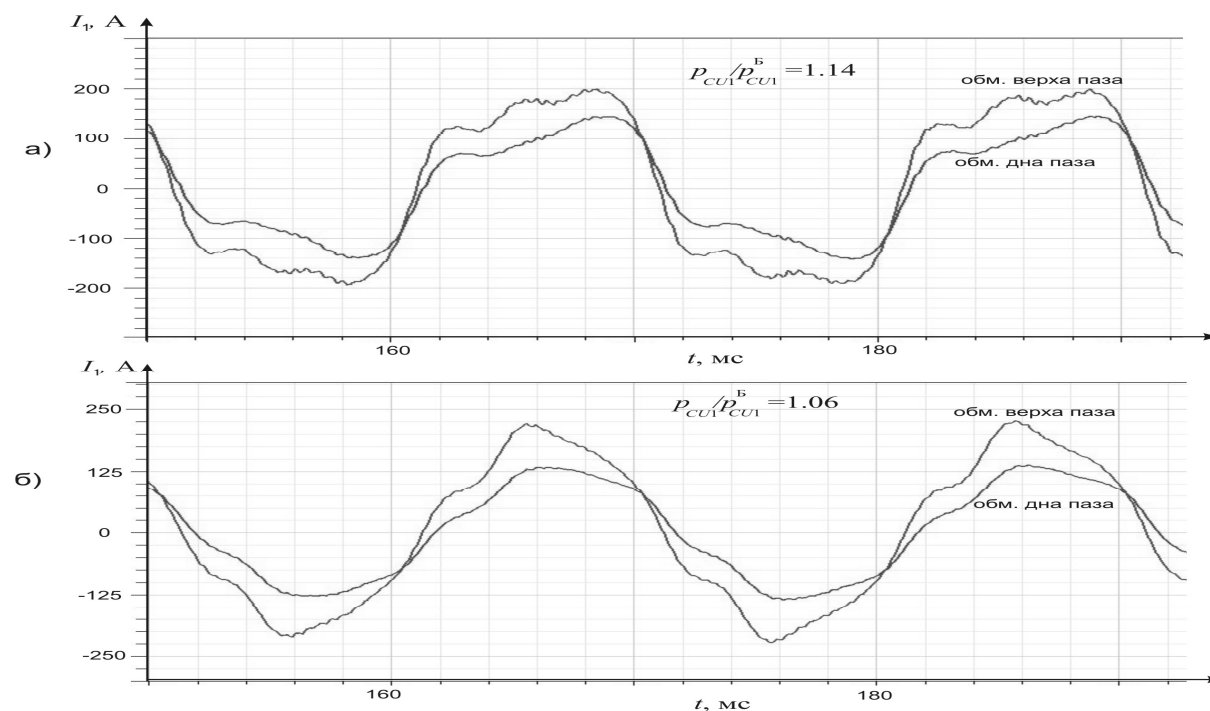


Рис. 2 Токи в обмотках электродвигателя
а – при соединении обмоток в Δ ; б- при соединении обмоток в Y

2. Ошибки в фактических показателях теплоотвода. Они, как правило, возникают в двух случаях – при изменении типа охлаждения и при игнорировании внешних условий теплоотвода (компоновки электродвигателя в изделии). Результат ошибки проявляется в больших величинах тепловых нагрузок элементов электродвигателя. В ряде случаев действие ошибки может быть снижено форсированием системы охлаждения при минимальных затратах.

3. Ошибки расчета диапазона регулирования. Они могут быть связаны с некорректным вычислением перегрузочной способности машины на повышенных частотах вращения. Часто это обусловлено игнорированием падения напряжения на инверторе, которое составляет до 20В [4]. Ограничение диапазона снизу, как правило, обусловлено неудачным выбором соотношения чисел зубцов статора и ротора.

ВЫВОДЫ

1. Синтез мехатронных системы необходимо проводить, начиная с проведения энергетического расчета. Результаты энергетического расчета определяют все характеристики мехатронной системы.

2. При проведении энергетического анализа мехатронных систем необходимо использовать математические модели и методики, достаточно полно отражающие физические процессы электрохимического преобразования энергии с учетом нелинейностей. Используемые

математические модели должны адекватно представлять тепловые процессы в машинной части мехатронной системы. Процессы управления должны моделироваться с учетом ограничений.

3. Энергетический синтез мехатронных систем целесообразно начинать с проектирования активной части электродвигателя. Хорошие результаты могут быть получены при использовании тактики постепенной модификации активной части машины от базового общепромышленного электродвигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чемоданов Б.К. Следящие приводы: в 2 т / Б.К. Чемоданов.- М.: Энергия, 1976.
2. Мелкозеров П.С. Энергетический расчет Энергетический расчет систем автоматического управления и следящих приводов / П.С. Мелкозеров.- М.: Энергия, 1968.
3. Захаров А.В. Влияние оболочки электрической машины на величину магнитных потерь / А.В. Захаров, А.С. Кобелев, С.В. Кудряшов // Труды международной конференции «Электромеханика, Электротехнологии, Электротехнические материалы и компоненты», Алушта, Крым, Украина, 2012. С.101-103.
4. Зайцев А.М. Новая серия частотно-регулируемых асинхронных двигателей общего применения разработки ОАО «НИПТИЭМ» / Зайцев А.М., Захаров А.В., Кобелев А.С., Крутиков О.В. // Электротехника.- 2008. №9.- С.2-10.